

ROTARY KILN(回轉窯)의

(技) (術) (論) (叢)



次元解析과 生産性の 考察

東洋세멘트工業株式會社

技術部次長

孫 惠 煥

目 次

1. 序
2. Rotary Kiln의 檢討
3. 크린카 燒成時 火焰 調整
4. 排風機(IDF) 및 排氣가스의 流動抵抗

1. 序 言

最近 數年間 急激히 增加하는 포트랜드 시멘트工業은 나날이 發展하는 途上에 있으며 石灰岩 地帶를 따라서 各樣 各色的의 시멘트工場이 建設되었고 또 建設中에 있다.

여기서는 經驗的인 資料와 理論을 基礎로 Rotary Kiln의 生産性を 檢討하고자 한다.

他社에서도 比較 檢討하여 多少나마 도움이 되고 또한 解析方法에 錯誤가 있을 때는 相互 기탄없는 비판과 討論이 있기를 바라는 바이다.

[註] Lepol과 Dopol Kiln에 限한다.

2. Rotary Kiln(回轉窯)의 檢討

(1) 次元解析

外國의 시멘트 機械製作會社에서 輸入된 Kiln

의 形態 및 生産性은 여러가지이다. 이것은 Ma-ker別 設計基準의 差로 인한 것임으로 論外로 하고 實際 運轉에서 다음의 要因을 檢討하면

Q : 크린카 生産量, T/D

V : Kiln의 內容積(煉瓦를 內張하지 않은 것)

P : 排風機 모-타 動力, KW

L : 키른의 길이, m

D : 키른의 內徑, m

$$fk = \frac{1000 Q}{24m^3} \text{는 } 62 \sim 70 \text{kg of clinker/hr.m}^3$$

가 正常的인 生産을 維持한다고 보며 그 以下는 生産性이 低下되어 있음을 一般的으로 論할 수 있다.

實例로 키른크기 L/D가 最下 12에서 16일 때 fk가 60~101kg/hr.m³까지 있음을 알았다.

勿論 生産性이 大端히 좋은 70 以上은 筆者가 檢討한 30餘基의 키른中 不過 4基밖에 없었으나 原料의 檢討 燒成의 問題性 解決로서 可能함을 나타낸다. 生産性의 向上은 단순히 技術的인 面에서 論하는 것이며 수반되는 投資 效果에 對해서는 紙面關係上 省略하기로 한다.

다음 $fp = \frac{Q}{P}$ 는 3.2 \mathbb{T} of clinker/kw서 6.5 t/kw 사이이고 例外로 9.0~9.3되는 것도 2基 있었다.

또한 Rotary Kiln의 生産能力은 W. Heiligen Staedt(하이리겐 스타트)氏 理論式에 따라

$$\frac{Q}{24h} = U \cdot D \cdot \pi \cdot \tan \beta \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \varphi \cdot GR(t/h)$$

여기서

Q : 生産量 t/d

D : 內徑 m

h : 時間 hr

u : Kiln 回轉速度(r. p. m)

$$\tan\beta = \frac{\sin\nu}{\sin r}$$

ν : 水平線에 對한 큰 長軸의 傾斜角 r 가 작은 値에서는 $r = \tan r$ 임.

r : 原料의 斜角. 이 角은 原料性質에 따라 決定됨.

GR : 容重. t/m³

ϕ : 負荷係數

$$\begin{aligned} \therefore \phi &= \frac{4M}{24h \cdot D^2 \cdot \pi \cdot \tan\beta \cdot D \cdot u \cdot GR} \\ &= \frac{4M}{24h \cdot D^2 \cdot \pi} \cdot \frac{\sin r}{D \cdot u \cdot \sin \nu \cdot GR} \\ &= \frac{4M}{24h \cdot D^2 \cdot \pi} - \text{Kiln 斷面에 걸리는 負荷 t/m}^2 \\ &\quad (\text{Cross-Sectional loading of Kiln}) \end{aligned}$$

다시 말하면

Loading factor ϕ (負荷係數)는

$$\begin{aligned} \phi &= (K) \cdot \left(\frac{\sin r}{GR} \right) \cdot \\ &\quad \frac{(\text{Cross-Sectional loading})}{(\text{Kiln Speed}) \times (\text{Kiln Inclination}\%) \times (D)} \\ &= (K) \cdot \left(\frac{\sin r}{GR} \right) \cdot \\ &\quad \frac{(\text{Kiln 斷面에 걸리는 負荷})}{(\text{Kiln 回轉速度}) (\text{Kiln 傾斜角}\%) (\text{直徑})} \end{aligned}$$

K : 恒數

$\frac{\sin r}{GR}$: 주어진 原料에 對해서는 恒數임.

Rotary Kiln의 回轉速度는 보통 0.75~2. r.p.m.이고 Kiln 傾斜角은 3~5%이다.

萬一 Kiln 斷面에 걸리는 負荷 Loading factor ϕ 는 Kiln 回轉速度와 Kiln 傾斜角을 增加시킴으로서 減少시킬 수 있으며 여기서 Portland Cement 1種을 生産하는 Kiln의 生産性은 주어진 與件을 改善 乃至 변경함으로써 最大로 올릴 수 있음을 나타낸다. 한 例로서는 55~57kg of clinker/h.m³ of kiln 밖에 안되던 것을 64~67 정도 까지 生産性을 높이는 데는 燒成部分 뿐만 아니라 全 工程의 再檢討를 하지 않으면 안된다. 가장 중요한 것은 溫度와 壓力分布 및 供給 및 排出되는 原料와 空氣量은 말할 必要도 없는 것이다.

Grate Surface Loading(Grate 表面負荷)을 보면 Kiln의 內容積 V와 Grate의 表面積 A와는 $V/A=5.2\sim 8.2\text{m}^3/\text{m}^2$ 정도이나 生産性이 높은 것은 $V/A=5.7$ 인 Kiln에서 700T/D에서 1.050 T/D까지 增産에 成功한 例도 있으며 그間的 努力은 于先 작은 것부터 큰 문제까지 解決한데 있으며 우연히 이루어진 것은 아니다.

Grate의 길이와 幅의 比 $L/W=4.6\sim 8.8$ 정도 까지 設計하나 效率적인 것은 5.5~6.5가 生産性이 높다.

(2) Kiln 運轉의 實際

① Lepol Kiln에서는 一段 成球를 만들어 乾燥와 部分 可燒反應을 시킨後 Kiln으로 들어 가나 精密한 運轉 操作盤이 施設되어 있다 해도 高溫과 飛散되는 原料 및 크린카 다스트로 因하여 精確한 상태를 나타내기 힘들다. 그러므로 各種 溫度計는 日 2~3回 빼내서 정비 點檢하여야 하며 各 點에서의 壓力 分布는 計器에만 依存할 것이 아니라 U字 管으로 點檢하여야 한다.

또한 I.D.F(Induced Draft Fan, 排風機)의 容량을 100% 活用할 수 있도록 하여야 한다. Kiln 內 燒成 상태가 良好하여 燃料量을 增加하였는데도 GRATE 溫度가 떨어질 때는 不完全 燃燒의 原因이 됨으로 于先 燃料量을 줄이고 燒成 상태를 調整한다. 反對로 高溫室의 壓力이 좋지 않고 온도가 떨어지는 傾向이 있을 때는 燃料量을 增加하여야 한다. 高溫室 GRATE를 通過한 排氣는 下部 Hopper의 中間壁을 通하여 乾燥室로 直接 들어가는 것을 거의 完全히 차단하여야 하며 部分的으로 들어갈 때 溫度는 勿論 壓力의 分布상태가 나빠진다.

GRATE 仕切壁(Partition wall)과 原料층間的 間격은 화염의 一部가 熱風과 함께 적당量 통과 되도록 上下로 調整할 수 있어야 한다.

一般的으로 100~120mm 정도의 間격이면 足하다.

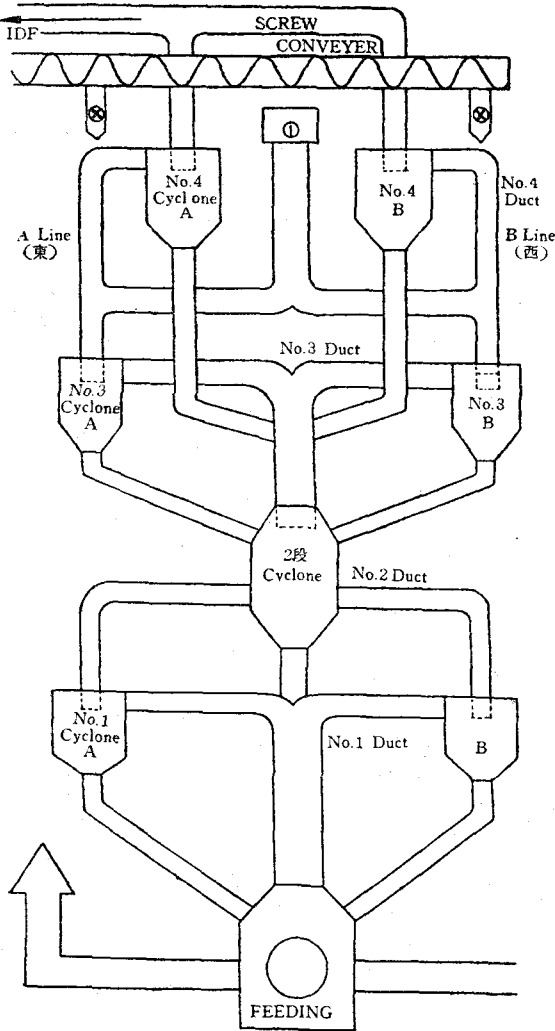
② DOPOL KILN (Dry Process)에서는 4段의 Cyclone에서 排氣中의 廢熱을 利用 豫熱하게 되는데 No. 1 Duct와 No. 1 Cyclone內서 거의

部分 可燃反應이 일어난다.

$$\text{大概 } \left(\frac{35-22}{35} \right) \times 100 = 37\%$$

即 조합원료內的 灼熱 減量分中 約 37~40% 정도가 可燃되는 상태에서에서만이 정상적인 生産

<그림 1> Dopol塔 配置圖



을 期待할 수 있다. 萬一 東側과 西側의 Cyclone 出口에서 Kiln으로 서로 다른 상태의 調合原料가 들어갈 때 燒成 상태는 不良하게 된다. 이것은 Air Suspension Preheater의 Housing에서 Cyclone No. 1의 A.B側으로 들어가는 GAS Velocity의 差로 因하여 各 Cyclone內部로 들어가는 調合原料量의 差가 생겨 發生하는 것이다.

수시로 1段 Cyclone 入口側에 누적되는 原料의 Poking은 勿論 補修時 空運轉 상태하에 各 支點에서의 靜壓 動壓을 추정하여 시정하여야 한다. 萬一 GAS Velocity가 낮을 경우(18m/sec 以下)에는 Cyclone의 入口 斷面을 수직方向으로 좁혀 斷面積을 계산하여 작게 해주어야 한다. 또한 Vortex Chamber(2段 Cyclone) 슈트에서 No 1 Duct로 들어갈 때 分散板이 있는데 이의 作動 調整 不良으로 調合原料 상태가 달라지는 경우 穴 있는데 이것은 여러가지 모양으로 分散板을 제조하여 數回 試驗하는 方法만이 가장 効果的 이다.

가장 上部의 No. 4 Cyclone의 集진 效率는 최소 90% 以上 되어야 하며 그 以下일 때는 集진 기의 效率저하는 勿論 生産性이 저하된다.

③ 2次 空氣의 調整

Lepol Kiln에서는 1.68Nm³/kg of clinker

Dopol Kiln에서는 2.50

가 소요되며 실제 Fuller Cooler에서 檢討한 결과에 의하면 DOPOL KILN에서 送込冷却 空氣가 2.6Nm³/kg of clinker이고 배출되버리는 冷却空氣量이 1.5Nm³/kg of clinker 정도가 된다. 다시 말하면 高溫과 적당량 의 2次 空氣를 어떻게 Kiln內로 送込시켜 주느냐에 따라 키른의 生産性은 4~6% 달라진다.

「例」 2次空氣의 量을 調整함으로써 日 平均 1,350T/D에서 約 45% 增産시킬 수가 있었다. Cooler에서 나가는 폐열을 回收하여 이용함으로써 熱消費 原單位를 저하할 수 있으나 우리 나라에서는 投資에 對한 效果가 작으므로 無視하는 경향이 있으나 이의 活用이 시급한 것으로 믿는다.

3. 크린카 소성時 火焰 調整

Kiln內서의 火焰은 크린카 燒成과 크린카 鑛物組成을 이루는데 있어서 가장 重要한 것이다. 火焰은 조밀한 化學反應帶이며 이 燃料과 산소가 反應하므로써 可燃物들이 發生한다.

燃料를 層流로 空氣와 混合하면 이것은 表面

燃燒 현상으로 火焰이 形成되며 自由狀의 分子의 集積體인 石炭을 燃燒하는데는 未燃燒된 炭 주위의 氣狀막을 燃燒空氣가 뚫고 들어갈 수 있도록 해 주어야 한다.

國內 시멘트 工場에서는 방카 C油와 無煙炭을 一定比로 混合하여 크린카 燒成하나 高壓噴射時 一次 空氣量과 火焰의 길이 및 연소 속도의 檢討는 수시 철저히 하여야 한다.

크린카는 주위 조건 即 키른 排氣 및 바나管 (nozzle pipe)內的 燃料의 속도 등과 함께 燃料에 따라 여러가지 길이의 火焰으로 燒成할 수 있다.

大型 Kiln에서는 燃料의 噴入속도가 62~75 m/sec(炭과 空氣混合)이고 火焰의 길이가 焦點帶를 결정하며 Kiln의 回轉 속도에 따라 크린카의 燒成時間이 決定된다. 一般的으로 焦點帶의 길이는 火焰의 1.5倍 정도이고 火焰이 긴 것은 焦點帶도 길고 排氣의 온도를 上昇시키며 熱經濟效率이 떨어진다.

火焰이 긴 상태하에서는 燒成 時間이 길므로 $C_3S(alite, 3CaO \cdot SiO_2)$ 가 形成되는 時間이 길고 燒成後에는 크린카 Kiln 出口로 나감에 따라 긴 火焰의 영향을 받는다. 크린카가 火焰을 벗어날 때는 徐冷되기 시작하며 크린카의 分解, 即 C_3S 가 C_2S 와 CaO 로 되어 크린카의 品質을 떨어침을 確認할 수 있다.

짧은 火焰에서는 C_3S 가 形成되는 時間이 짧으며 燒成時 各種相의 平形時間이 짧다.

亂流에서는 짧고 高溫의 火焰을 쉽게 얻을 수 있으며 조정하기도 容易하다. 2次 空氣溫度가 높을 수록 火焰은 짧게 되고 Kiln 出口에 가까운 곳에 焦點이 짧게 소요됨을 알 수 있다.

실제적으로 各種 燃料에 對한 火焰의 性格과 火焰을 조절할 수 있는 것만이 生産하려는 크린카 品質을 보장할 수 있고 크린카 燒成 과정을 發展시킬 수 있는 것으로 確信하는 바이다.

4. 排風機(IDF) 및 排氣 개스의 流動抵抗

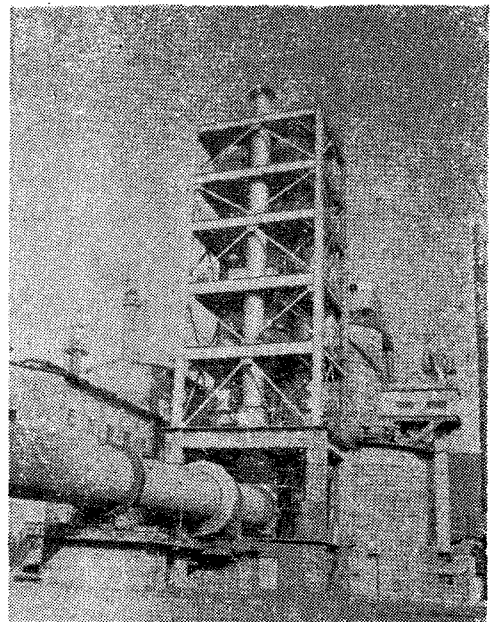
여기서는 흔히 現場에서 體驗하는 排風機 또

는 부로워(Blower)의 容量을 어떻게 하면 100% 活用할 수 있으며 통풍저항에 依한 氣相의 정상 흐름의 영향을 검토하기로 한다.

送風機의 運轉合理化는 動力이 적게 들도록 可能限한 經濟的으로 운전하는 것이다. 그렇게 하려면 먼저 計劃에 完全히 合致하는 송풍기를 제작하여야 한다.

最初計劃할 때 多少의 餘裕를 보고 다시 製作者가 約 5% 정도 餘裕를 보았을 때 실제 운전 現場에서는 容量이 너무 커 損과를 조려서 또는 可變速인 경우 回轉機를 떨어져서 운전하는 경우가 생기는데 이것은 대단한 損失이고 再考하지 않으면 안된다. 送風機 以外的 配管 및 付屬品도 損失이 되는 것은 될수록 避하여야 한다. 마찰損失을 극히 적게 計劃을 하지 않으면 안된다. 風管의 직경도 經濟的으로 決定 施設하여야 한다.

<그림 2> Dopol 塔의 威容

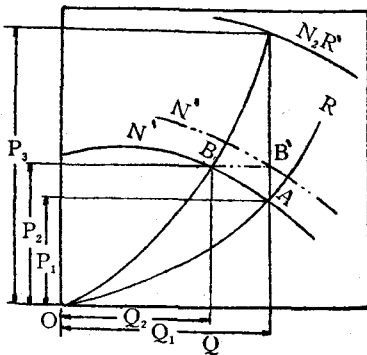


萬一 設計의 變更, 計劃이 틀려서 또는 用途 變更으로 因하여 제작된 機械의 要領을 變更하여 使用코저 할 때가 때때로 생긴다. 例로 風量을 증가하고 싶든가 風壓을 올리고 싶든가 할 때의 對策은 周知하는 바와 같이 風量 風壓 動力은 回轉數의 1. 2. 3. 乘에 比例하여 變化한다.

(1) 回轉數에 의한 變更

그림 3 에서 N_1 回轉數에서 $Q_1 P_1$ 을 要求하는 送風機를 제작하였으나 실제 운전하니 抵抗曲線이 計劃의 OR에 對해 OR' 로 증가했을 때를 생각하면 이 送風期는 Q_2, P_2 即 B 點에 相當하게 운전한다. 운전中에 確認하려면 風量을 측정하면 되나 如意치 않으면 風壓 또는 動力을 測定하여 性能曲線上에서 구하면 된다. Q_1 을 要求하는데 Q_2 밖에 風量이 안나올 때 $N_2 = N_1 \frac{Q_1}{Q_2}$ 의 比로 N_2 를 올려야 한다. 이때 曲線上에서는 N_2 曲線이 된다.

<그림 3>



風壓은 $P_3 = P_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$ 의 比로 上昇한다. 따라서 計劃보다 저항이 크면 轉數를 即 抵抗曲線이 높으면 높을 수록 回轉數의 증가는 많아진다. 어떤 경우에는 回轉數를 올리기만 해도 만족이 안될 때가 있는데 이때는 임페라의 外徑을 크게 하든가 임페라 出口角度를 세워서 風量을 많이 내도록 改造하여야 한다.

回轉數를 上昇시킬 때는 임페라, 푸리軸의 강도, 베어링 V-벨트 軸의 위험속도 등은 잘 검토하여야 함은 勿論이다.

(2) 임페라 加工

要求하는 送風기가 너무 클 경우에는 상시 「담파」를 좁혀서 운전하지 않으면 안되는 不經濟的

인 問題가 생기며 取扱하는 氣스의 比重이 計劃보다 무거울 경우는 風壓이 너무 커져 모타가 과부하가 됨으로 임페라 外徑을 작게 하지 않으면 안된다.

$$이때 Q \propto D$$

$$P \propto D^2$$

$KW \propto D^3$ 의 關係式에 따라 變化한다.

(3) 싸이클 變更

우리 나라 여건下에서는 60싸이클 送電임으로 특별한 問題가 없으나 一般적으로 50싸이클에서 60싸이클로 變更하면 回轉速度가 빨라짐으로 임페라의 外徑을 작게 하는 方法도 있다.

이때 싸이클 變更時 따르는 기체류의 정비가 소요되나 여기서는 回轉數 增減에 對한 한 方法으로의 可能性만 論하고 實際問題는 다루지 않기로 한다.

(4) 氣스의 比重變更

吹込 氣스의 溫度가 變更되든가 氣스의 組成이 變하여 比重量이 變更되든가 하면 送風기에 미치는 影響은 크다.

風壓 動力 共히 比重에 比例하여 變化함으로 比重이 작아지면 風壓은 낮아지고 動力도 적게 들고 反對로 커지면 風壓은 높아지고 動力도 더 커진다. 前者의 경우는 風壓不足 後者の 경우는 모타負荷가 증가하여 送風機要求를 充足 못시킨다. 이런 경우 回轉數를 上昇 또는 「케이싱」 範圍內서 「임페라」를 크게 하든가 「임페라」 出口角度를 變更시켜 再제작하여야 한다.

某 工場에서 실제 發生한 問題이나 增速으로 因한 風壓 風量의 上昇을 企圖한바 如意치 않았던 것은 上記한 問題를 철저히 검토 分析하지 못한데 있다. 특히 計劃 온도보다 높은 氣스를 取扱할 때 使用材料 구조 등 注意하지 않으면 안된다. 시멘트 工場에서는 300°C 以上되는 氣스를 取扱할 경우가 반드시 있는데 使用材料 강도가 急激히 低下하고 安全率이 減少되므로 相當한 검토가 要한다.

이상과 같이 送風機에 對한 여러가지 경우를 論했으나 現場에서의 실제 문제는 더 復雜한 것이 많으리라고 生覺된다.

다음 等溫개스의 流動低抗을 考察한다. 큰 排氣는 IDF를 통해 煙突로 排出될 때 溫度는 徐徐히 低下하나 개스의 通風저항을 검토할 때는 等溫개스로 보는 것이 容易하며 그렇지 않다고 볼 때는 너무 復雜한 경우가 생겨 실제로 解析하기 困難하리라 믿는다.

개스의 流動 저항은 마찰저항과 渦波저항 2종으로 볼 수 있다.

마찰저항은 導管을 통과시 兩端의 壓力降下 ΔPf 는 Fanning式으로 계산 가능하다.

$$\Delta Pf = f \left(\frac{L}{M} \right) \left(\frac{\rho u^2}{2g_c} \right) = \left(\frac{\lambda}{4} \right) \left(\frac{L}{M} \right) \left(\frac{\rho u^2}{2g_c} \right)$$

$$\Delta f = \lambda$$

f, λ : 마찰계수

空氣, 연소개스의 경우

$$\rho = 1.3 \times 273 / T \text{ (Kg/m}^3\text{) 임으로}$$

$$\Delta Pf = (f) \left(\frac{L}{M} \right) \left(\frac{18.1}{T} \right) u^2 = \frac{\lambda \cdot L \cdot (4.53) u^2}{M \cdot T}$$

T : 절대온도(K) L : 管의 길이(m)

水力半徑 M 는 斷面積(m^2)을 斷面주위 (m)로 나눈 것이고 例로 圓管에서는

$$M = \frac{\pi \cdot d^2 / 4}{\pi d} = \frac{d}{4}, \text{ 矩形에서는 } \frac{a \cdot b}{2(a+b)} \text{ 가 된다.}$$

λ : 마찰저항계수는 管徑, 管의 材料, 管의 表面의 荒粗度, 개스의 성질, 온도 속도 등에 따라 결정됨. 시멘트 공장에서는 Kiln 排氣인 경우 $\lambda = 0.02 \sim 0.03$ 을 取하면 된다.

ρ : 개스 용중

u : 개스 속도

g_c : 중力 가속도

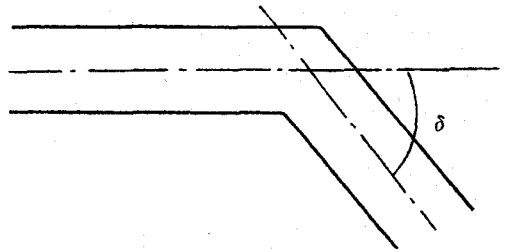
例로 350°C의 배기개스가 직徑 1m의 煙道內를 3m/sec 속도로 흐를 때 100m當 壓力 손실은

$$\Delta Pf = (0.03) \left(\frac{100}{1} \right) \left(\frac{1.3 \times 273}{273 + 350} \right) \left(\frac{18^2}{2 \times 9.8} \right)$$

$$= 28.25 \text{ Kg/m}^2 = 28.25 \text{ mm 水柱}$$

即 28.25mm 水柱의 壓損이 생김으로 IDF의 吐出壓力를 검토하여야 施設 變更 또는 증산을 할 경우 可能한 것이다. 勿論 曲管 또는 擴大 縮少되는 燃道에 對해서는 계산 Factor(因數)가 있으며 여기서는 紙面관계上 略하기로 한다.

다음 渦波 저항은 渦流 개스의 收縮 膨창에 의해 생기는 것으로 실제로는 爐 또는 煙道內서 大部分 점하는 것이다. 이것은 煙도가 굽으러질 때와 分岐 또는 合流할 때 개스의 通路가 좁아



지든가 퍼질 때 煙도에 장애물이 있을 때 등을 生覺할 수 있으며 外 개스 自體의 수축 膨창에 의한 것도 생각할 수 있다.

계산式은 $\Delta Pt = \phi \left(\frac{18.1}{T} \right) u^2$ 으로 大略 계산한다. ϕ 는 煙도의 모양에 따라 決定된다. 例로 荒粗管인 경우

$$\delta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$$

$$\phi = 0.32, 0.32, 0.68, 1.27 \text{ 임.}$$

끝으로 시멘트 공장에서 검토하여야 할 문제가 山積되 있으나 계속 研究 검토되는데로 相互 토론할 수 있는 기회가 있으리라고 믿고 이만 줄인다.

참고 문헌

1. 工業窯爐, 矢木榮 著
2. Mineral Processing. August 1967.
3. Heat Transfer in Rotary Kiln, Germany
4. 窯業工學 Hand Book.
5. 送風機와 壓縮機, 中條德三郎 編
3. Chemical Engineers' Hand book, 4版, Perry.

(1968.11.6 接受)